# 高速铁路钢轨电磁检测试验

王　平[1]，丁　松[1]，田贵云[1,2]，王海涛[1]，杨雅荣[1]
（1. 南京航空航天大学自动化学院，江苏　210016；2. 纽卡斯尔大学 计算机与电子工程学院，英国）

**摘　要**：高速铁路损伤的缺陷主要表现形式发生变化，对其巡检已成为世界各国无损检测的重大课题。采用电磁检测方法，通过仿真及试验研究，结合钢轨实际案例进行分析验证，初步建立在高速运动的交直流激励作用下，被测钢轨材料及其表面、亚表面一定深度下的钢轨裂纹、应力等多种因素与被测材料表面三维等效脉冲涡流电磁场、磁泄漏和剩磁、巴克豪森噪声信号响应的关系。

**关键词**：高速铁路；电磁检测；缺陷；应力

**中图分类号**：TG115.28　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000-6656(2010)11-0829-04

## Electromagnetic Detection of High-Speed Railway

WANG Ping[1], DING Song[1], TIAN Gui-Yun[1,2], WANG Hai-Tao[1], YANG Ya-Rong[1]
(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. School of Electrical, Electronic and Computer Engineering, Merz Court, University of Newcastle, Newcastle upon Tyne, UK)

**Abstract**: The oblique cracks are very dangerous in high speed railway, and rather difficult to be detected. In this paper electromagnetic techniques are used to solve this problem. By means of simulation and experimentation of rail sample, the relationship between the electromagnetic response of rail head material under excitation and the situation of defects and stress in the surface and subsurface is researched. The model also contains the variables of different feature of defects in the material and stress of the material. Based on the results of simulation, a Yoke and 3D magnetic sensor array is formed and PMFL, PEC effects are measured to get the feature of defects while the magnetic memory effect and Barkhausen noise are measured to get the information of stress formulation in a non-contact way.

**Keywords**: High-speed railway; Electromagnetic detection; Defect; Stress

随着我国高速铁路的建设进入一个快速发展的阶段，行车密度、载重量和行车速度的不断提高加速了铁轨的损伤，同时也改变了损伤的主要表现模式[1]，尤其是在我国线路状况复杂的前提下，对于高速铁路轨道的安全保障是当今一个重大和前沿的课题。

无损检测技术应用于高速铁路钢轨检测具有相当的难度。首先，导致钢轨损坏的缺陷种类很多，包括位于表面的疲劳损伤、应力腐蚀、裂纹和剥离等，位于钢轨亚表面或者内部的斜裂纹；再者，造成损伤的机理复杂，定性和定量评估都存在相当难度。超声等大部分目前的无损检测方法仅能检测出已发展成形的一定尺度的缺陷，而无法判别导致钢轨内部应力集中的原因、以及应力分布状态与损伤原因之间的映射关系，因此它们对钢轨的早期损伤，特别是尚未成形的隐性不连续性变化，难以实施有效的评价。

为此，笔者采用电磁检测方法，建立起在高速运动的交流激励下，钢轨表面、亚表面一定深度下的裂纹、应力和微观结构变化等多种因素与脉冲涡流电磁场、磁泄漏和巴克豪森信号响应的关系模型，得出被测钢轨的裂纹特征、应力分布和微观隐性缺陷等信息。

## 1　国内外研究现状

目前的高速钢轨缺陷检测研究中，主要采用远

**作者简介**：王　平（1977－），男，博士，副教授，研究方向为测试计量技术与仪器。

程超声、交流场测量(ACFM)传感技术、电磁超声传感器(EMATS)、激光超声、超声相控阵和导波等技术。美国在高速钢轨在线检测方面具有领先地位,美国铁路公司通过对超声与磁感应技术的集成,研制了高速铁路钢轨检测车[2],如图1所示,其检测速度达32 km/h,但是有时需要停车确认。为克服常规超声检测技术在高速钢轨检测中的检测范围和检测速度限制,美国运输部联邦铁路局资助California大学进行基于超声导波技术的非接触高速钢轨检测技术研究,其研究内容涉及超声导波、非接触传感器和先进信号处理技术,目标是同时检测横向断裂与纵向裂纹/表层脱落,并于2005年搭建了由脉冲激光导波与空气耦合传感器组成的原型系统[3]。Francesco等[4]提出了一种集成声反射、超声导波和声传导、脉冲激光的高速钢轨缺陷检测方法,可同时检测横向缺陷和纵向缺陷。此外,也有学者研究半解析有限元方法(SAFE)用于预测导波在钢轨中的传播问题,并开发了基于超声导波及先进的信号处理算法的非接触激励与检测系统,2008年3月测试样机最高巡检速度达到10 km/h[5]。

图1　集成超声与磁感应技术的轨道巡检车[6]

英国Birmingham大学[7]采用ACFM技术研制了检测速度达121.5 km/h的钢轨检测车。英国Warwick大学的研究人员[8]已经开发出高速的超声波探伤技术,用于检测轨道内的裂纹和其他缺陷,其检测深度可达轨面下15 mm,理论上运行速度可达320 km/h。英国Warwick大学的Edwards等与田贵云教授[9]联合研究了脉冲涡流技术在铁磁性材料(如火车的铁轨)缺陷检测中的应用,并以集成脉冲涡流和电磁超声换能器的方法,将脉冲涡流和EMAT集成于同一个探头以进行测量和试验比较。德国、日本和法国的研究机构也在此领域进行了大量研究。此外,作为检测残余应力、疲劳寿命预测及热处理缺陷的有效方法,国外学者对巴克豪森方法也开展了一些研究,探讨了其信号与铁磁性材料在弹性和塑性形变下应力情况以及微观结构状态之间的关系[10-13]。

国内的学者和研究机构在与高速钢轨缺陷检测技术相关领域也开展了一些研究工作,并取得了一定成果。西南交通大学牵引动力国家重点实验室刘启跃等近年来一直从事高速铁路上斜裂纹的形成机理研究,以摩擦学为原理,结合弹塑性力学,采用有限元等工具进行数值分析[14-16]。铁道科学研究院田振海[17-18]等人也曾经对钢轨损伤类型进行分析研究。祝连庆[19]等开发了基于超声技术的钢轨高速探伤系统。金炜等[20]设计开发了基于超声技术的钢轨探伤小车,探测速度达到了80 km/h。刘泽等人采用电磁层析的方法对重伤钢轨进行损伤探测研究。华中理工大学的马咸尧等[21-22]重点研究了钢铁件在平面应力状态下巴克豪森噪声强度随磁化方向改变呈周期性变化的规律。哈尔滨工程大学的祁欣等[23-25]研究了材料受力对MBN频谱影响的规律,从时域和频域两方面来探讨巴克豪森信号变化的规律性。田浩等[26]研究了钢轨材料中的巴克豪森信号随拉应力、压应力和温度的变化关系。国内这些研究工作均为电磁无损检测技术应用于钢轨巡检奠定了基础。另外,英国Newcastle大学的田贵云教授等人在近期工作中发现[27],在高速移动的情况下,移动速度将对电磁检测造成的电磁场响应形成影响,如在高速移动的直流激励下,对被测金属部件的作用等效于一定形状的脉冲激励,而等效脉冲的斜率和形状与移动速度相关。在激励与被测部件的相互作用下,响应电磁场的特性能够反映裂纹、铁磁性材料的应力分布和微观结构的情况,从而为被测部件的寿命评估提供关键信息[28]。

## 2　检测系统试验平台

在理论分析和仿真试验的基础上,笔者建立了一个基础性的实际试验平台,可以进行包含巴克豪森、涡流、脉冲漏磁和脉冲磁阻等多种电磁检测方法的试验。试验平台由传感器部分、信号放大调理部分、数据采集部分、信号激励部分、码盘位置信号采集部分和计算机处理部分以及钢轨试样组成,平台结构如图2所示。

在励磁信号上,根据移动速度的不同,拟采用不同频率和波形的激励源。在移动速度<12 m/s(模拟手推式检测车的移动巡检)的情况下,采用脉冲激励。而在高速移动情况下,拟采用直流激励,在高速

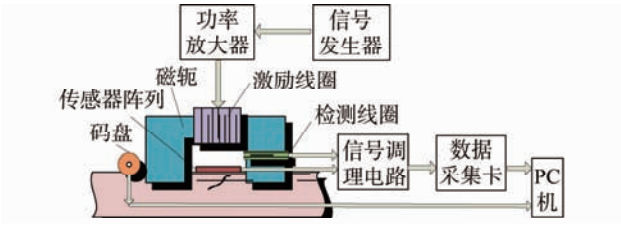


图 2　基础性的实际试验平台结构

移动效应的影响下,将等效于一定激励波形的脉冲激励。

其中 U 型磁轭的两个 U 型臂下表面可与钢轨上表面吻合并留有一定间隙。激励线圈缠绕于磁轭的中间段,在计算机程序控制下由功率放大器驱动,产生强烈的脉冲激励磁场。磁轭一个 U 型臂上的感应线圈用于实现脉冲磁阻测量方式下对于磁路磁阻的测量,作为对脉冲涡流、脉冲漏磁测量方式的补充和参考。传感器阵列位于磁轭的中间段与钢轨表面之间靠近钢轨表面的空间,以实现对脉冲激励下钢轨缺陷周围响应磁场的测量。笔者拟采用两种传感器阵列:一种为同时测量磁场水平分量($X$,$Y$ 方向)和垂直分量($Z$ 方向)的线阵列;另一种为 $N\times N$ 矩阵排列的阵列结构,仅测量 $Z$ 方向的磁场。根据不同的激励大小和频率范围、灵敏度要求,传感器阵列结构由感应线圈、Hall 元件和巨磁阻磁敏元件组成。通过检测脉冲激励下磁场直线上的分布情况,在对缺陷位置和特性进行辨识的同时,拟根据各传感器输出之间的相位和耦合关系,补偿高速巡检时的速度影响,以此提高巡检速率。传感器阵列的输出信号和感应线圈的响应信号经信号调理后,进行多通道的同步高速数据采集并被传输到计算机上进行处理,实现对传感器阵列中各个传感器单元的输出信号和感应线圈的响应信号进行分析、对当前检测系统移动速度的计算和对移动速度和提离效应的补偿,最终形成被测钢轨不同深度缺陷情况、应力分布情况的图像,实现对缺陷裂纹进行判断和定位。

## 3　试验

在此试验平台上,对带有缺陷的钢轨试样进行了试验分析,并取得了初步的试验成果。

### 3.1　裂纹检测试验

图 3 为采用线阵列传感器对钢轨斜裂纹缺陷轴位的响应磁场进行检测的数据分析结果。

图 3 所示,斜裂纹位于 4,5,6 号传感器单元位置下方,从 6 号传感器单元位置开始斜向下发展。

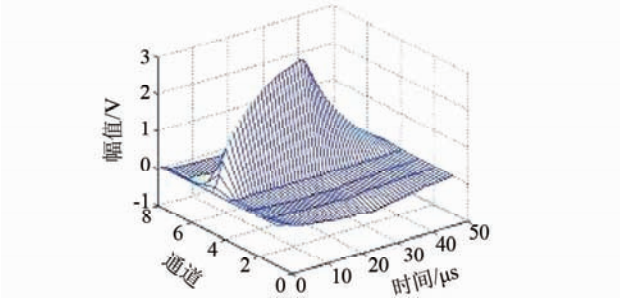


图 3　磁传感器线阵列对具有斜裂纹的钢轨试样检测和分析

从不同时间点上缺陷附近各个传感器位置的响应磁场分布情况可以看出,裂纹的倾斜方向导致响应磁场在裂纹附近呈不对称分布。

### 3.2　应力检测试验

试验系统采用巴克豪森噪声(MBN)检测技术对 60 kg/m 钢轨加载应力进行试验,图 4 为应力加载示意图。

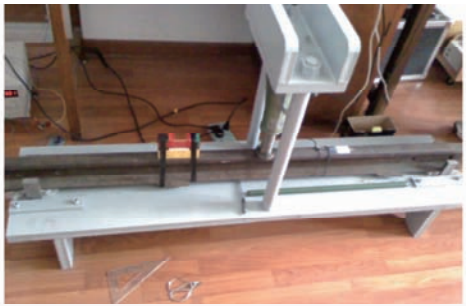

图 4　钢轨应力加载示意图

图 5 所示为 50 Hz 激励条件下,以均方根作为 MBN 信号特征值分析,所得测试信号与压应力的对应关系。可见,在弹性范围内,MBN 均方根与压应力呈单调趋势,随着压应力增大而减小,但变化斜率随所加应力范围有所区别。在 60 MPa 以内,MBN 均方根与应力具有比较好的线性关系。

试验还发现,在系统所加激励下,60 kg/m 轨的 MBN 信号频带很宽,且在 100 kHz 取得最大值。

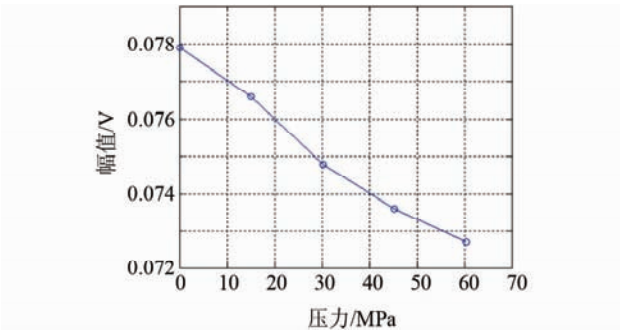


图 5　BN 信号均方根与压应力关系

## 4　结论

针对目前钢轨损伤的主要形式和特点,以及我国铁路部门对于钢轨应力检测的需求,提出的检测系统结合了多种电磁测量方式,可采集裂纹、应力等因素对三维等效脉冲涡流电磁场、磁泄漏和剩磁、巴克豪森噪声信号的影响,可对多种测试信号信息融合,提高测试的准确率;利用巴克豪森效应和剩磁效应,通过对被测材料的应力分布情况以及微观结构进行检测,提出对隐性缺陷进行预估的原理与方法,可弥补常规的无损检测只能对既有缺陷进行检测而无法进行缺陷预估的不足。

**参考文献:**


[1] Zhao Xueqin, Wang Wenjian, Guo Jun, et al. An investigation on formation characteristic of oblique crack of PD3 and U71Mn rail in Guangzhou-Shenzhen railway[J]. Lubrication Engineering,2007,32(3):35－40.

[2] Robin Clark. Rail flaw detection: overview and needs for future developments[J]. NDT&E International, 2004,37(2):111－118.

[3] U S Department of Transportation Federal Railroad Administration. On-line High-speed Rail Defect Detection - Phase III[EB/OL]. http://www.fra.dot.gov/downloads/research/rr0507.pdf.

[4] Francesco Lanza di Scalea, Ivan Bartoli, Piervincenzo Rizzo, et al. High-speed defect detection in rails by noncontact guided ultrasonic testing[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board,2005,19(16):66－67.

[5] U S Department of Transportation Federal Railroad Administration. On-line High-speed Rail Defect Detection[EB/OL]. http://www.fra.dot.gov/downloads/research/rr0825.pdf.

[6] NDT Source Center. Rail Inspection[EB/OL]. http://www.ndt-ed.org/AboutNDT/SelectedApplications/RailInspection/RailInspection.htm.

[7] Rachel S Edwards, Steve Dixon, Xiaoming Jian. Noncontact ultrasonic testing of the railhead[EB/OL]. http://www2.theiet.org/oncomms/pn/measurement/RI-EDWARDS.pdf.

[8] Papaelias M Ph, Lugg M C, Roberts C, et al. High-speed inspection of rails using ACFM techniques[J]. NDT&E International,2009,42(2):328－335.

[9] Edwards R S, Sophian A, Dixona S, et al. Dual EMAT and PEC non-contact probe applications to defect testing[J]. NDT&E International,2006,39(1):45－52.

[10] Clapham L, White S, Lee J, et al. Atherton, Magnetic easy axis development in steel—the influence of manufacturing[J]. Appl Phys,2000,88(4):2163－2165.

[11] Djordje Spasojević, Srdjan Bukvić, Sava Milošević, et al. Barkhausen noise: Elementary signals, power laws, and scaling relations[J]. Phys Rev E,1996(54):2531－2546.

[12] Mehta Amit P, Mills Andrea C. Universal pulse shape scaling function and exponents: Critical test for avalanche models applied to Barkhausen noise[J]. Physical Review E,2002(65):046139.

[13] Kownacki C. The application of multiparametric analysis of Barkhausen noise using continuous wavelet transform in comparative stress testing[EB/OL]. http://www.informaworld.com/smpp/title～content=t713645777～db=all～tab=issueslist～branches=23－v2323.

[14] 刘启跃,王文健,周仲荣.高速与重载铁路钢轨损伤及预防技术差异研究[J].润滑与密封,2007,32(11):11－14.

[15] 赵雪芹,钟雯,王文健,等.高速重载线路钢轨损伤特性分析[J].润滑与密封,2007,32(10):100－102.

[16] 赵雪芹,王文健,郭俊,等.广深线PD3与U71Mn钢轨斜裂纹形成特性分析[J].润滑与密封,2007,32(3):35－37.

[17] 刘学文,邹定强,邢丽贤,等.钢轨踏面斜裂纹伤损原因及对策的研究[J].中国铁道科学,2004,25(2):82－87.

[18] 李晶晶,田常海,汪越胜.U71Mn和U75V钢轨钢疲劳短裂纹的扩展行为[J].钢铁研究学报,2006,18(4):37－40.

[19] 祝连庆.钢轨高速探伤系统的研究[J].仪器仪表学报,2002,23(增3):119－121.

[20] 金炜.新型钢轨探伤中试试验车探伤小车的研制[J].铁道机车车辆,2005,25(5):31－34.

[21] 马咸尧,孙大千.巴克豪森应力效应的研究[J].华中理工大学学报,1994,22(9):29－33.

[22] 马咸尧,孙大千.利用磁声法测量钢铁构件表面应力[J].华中理工大学学报,1996,24(07):40－45.

[23] 祁欣,陈滨,刘殿魁.铁磁材料内应力、硬度、组织对巴克豪森噪讯的影响[J].哈尔滨工程大学学报,1999,20(1):94－97.

[24] 祁欣,于石生.无缝线路钢轨纵向应力在线检测研究[J].机械工程学报,1998(2):104－109.


(下转第835页)

表 2　模拟裂纹测量结果(长度×高度)　mm

| 序号 | 外侧 | | 内侧 | |
|---|---|---|---|---|
| | 设计值 | 测量值 | 设计值 | 测量值 |
| 1 | 20×6 | 25×6.3 | 10×2 | 8×1.7 |
| 2 | 10×2 | 14×2.0 | 20×6 | 19×6.0 |
| 3 | 20×4 | 27×4.3 | 5×2 | 4×1.9 |
| 4 | 5×2 | 8×2.1 | 20×4 | 19×4.0 |
| 5 | 20×2 | 24×2.2 | 10×1 | 7×1.2 |
| 6 | 10×1 | 13×1.2 | 20×2 | 19×2.1 |
| 7 | 20×1 | 23×1.1 | 5×1 | 3×1.2 |
| 8 | 5×1 | 7×1.1 | 20×1 | 17×1.3 |

从表 2 结果可见,高度测量误差最大值为 0.3 mm。长度测量误差大是因环形扫查时编码器位置造成的,完全可以通过校准和计算修正[4],控制在应有的范围。

### 3.5　自然裂纹的检测和定量

采用模拟裂纹检测和定量的工艺,对图 4 所示的密封槽自然裂纹进行检测,得到图 7 和 8 所示 B 扫描图像。图 7 显示,直通波不是一条直线,并有明显的波浪,峰谷差测量值<1.0 mm。图 8 图像右侧为较深自然裂纹部位,测量值为 2.1 mm。

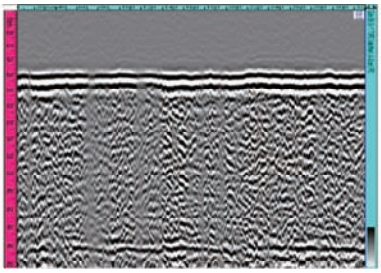

图 7　较浅自然裂纹部位 B 扫图像

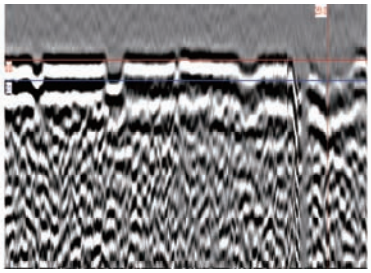

图 8　较深自然裂纹部位 B 扫图像

### 3.6　自然裂纹的解剖

对图 7 相应自然裂纹部位解剖,确认裂纹高度最大为 0.5 mm。对图 8 相应自然裂纹部位,取裂纹高度较大区段解剖,采用 PT 法和显微方法测得裂纹高度,结果见表 3。

表 3　自然裂纹高度测量值　mm

| 序号 | PT 测量 | 显微测量 | 序号 | PT 测量 | 显微测量 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.5 | — | 5 | 2.5 | 2.4 |
| 2 | 1.2 | 1.4 | 6 | 2.2 | 1.8 |
| 3 | 2.0 | 2.0 | 7 | 1.5 | 1.2 |
| 4 | 2.2 | 2.2 | 8 | — | — |

表 3 显示自然裂纹最大高度测量值为2.5 mm,与 TOFD 方法最大测量值 2.1 mm 相比,误差为 −0.4 mm。

## 4　结语

(1) 采用特殊的 TOFD 超声检测工艺,结合专用工装和专用探头,可实现反应器法兰密封槽裂纹的检测和定量。

(2) 法兰密封槽裂纹的检测灵敏度达到 5 mm ×1 mm(长度×高度),裂纹高度测量误差 <0.5 mm,完全满足工程应用中反应器安全评估的要求。

(3) 该技术适用于多种规格和材质法兰密封槽裂纹的检测和定量,具有实际应用价值。

**参考文献:**


[1] 孙永令,彭云,马成东,等.加氢反应器应力有限元分析报告[R].北京:北京钢铁研究总院,2009.

[2] 李志军.法兰试件检测仿真报告[R].北京:麦瑞克斯技术(北京)有限公司,2008.

[3] 强天鹏.超声衍射时差(TOFD)检测技术[M].北京:全国特种设备无损检测人员考委会,2008.

[4] 陈永强,王郁林,朱勇,等.加氢反应器法兰密封槽裂纹检测和定量研究报告[R].南京:中石化集团金陵分公司,2009.


(上接第 832 页)


[25] 祁欣,刘明翠.巴克豪森效应和磁滞曲线的测定[J].实验技术与管理,2007(6):25−27.

[26] 田浩,于石生,赵小莹.利用巴克豪森效应测定钢轨纵向应力[J].材料科学与工艺,2004,12(02):196−198.

[27] Li Y, Tian G Y, Ward S. Numerical simulation on magnetic flux leakage testing at high speed[J]. NDT & E International, 2006, 39(5):367−373.

[28] Wilson John W, Tian Gui Yun. Pulsed electromagnetic methods for defect detection and characterization [J]. NDT & E International,2007,40(4):275−283.